

УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ ОДНОФАЗНОГО МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ ПРИ ПИТАНИИ НАПРЯЖЕНИЕМ ОСНОВНОЙ И УТРОЕННОЙ ЧАСТОТ

Если питание однофазного диодного выпрямителя осуществить от источника э. д. с. несинусоидальной формы, получаемой сложением э. д. с. основной и тройной частот, то, изменяя амплитуду или начальную фазу одной из составляющих э. д. с., можно изменять величину выпрямленного тока нагрузки. Такой способ

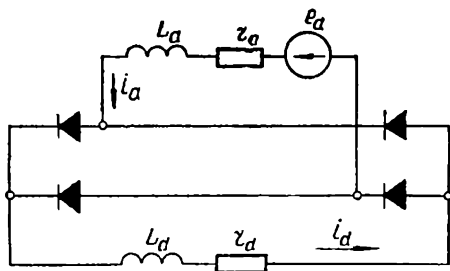


Рис. 1. Расчетная схема выпрямителя:

e_a , i_a — мгновенные значения э. д. с. и тока цепи питания; u_d , i_d — напряжения и тока нагрузки; L_a , r_a — индуктивность и активное сопротивление цепи питания; L_d , r_d — цепи нагрузки.

регулирования может применяться, в частности, для регулирования тока возбуждения синхронной машины. В статье рассматриваются процессы в выпрямителе и характеристики установившегося режима работы.

Рассмотрим работу выпрямителя (рис. 1) при $r_d \ll L_d$, что справедливо при нагрузке на обмотку возбуждения синхронной машины. Предполагается, что вентили идеальные, активное сопротивление цепи питания равно

нулю и ток нагрузки не имеет пульсаций.

Возможные режимы работы выпрямителя. Работа выпрямителя при наличии индуктивностей во входной и выходной цепях характеризуется режимом $N-A$ [1], где N — режим работы двух вентилей, для которого при принятых допущениях

$$|i_a| = I_d; \quad (1)$$

$$|e_a| = u_d. \quad (2)$$

A — режим работы четырех вентилей (интервала коммутации), когда напряжение на нагрузке равно нулю, а ток в питающей цепи изменяется за счет переходного тока коммутации i_{ak} ;

$$i_a = \pm I_d + i_{ak}; \quad (3)$$

$$i_{ak} = \frac{1}{x_a} \int_{\Theta_n}^{\Theta_n + \gamma_n} e_a d\Theta. \quad (4)$$

Здесь $\Theta = \omega t$, $x_a = \omega L_a$;

ω — угловая частота основной гармоники э. д. с.;

Θ_n — угол, соответствующий моменту начала коммутации;

γ_n — угловая длительность коммутации;

\pm — знак при I_d соответствует знаку тока i_a в момент, предшествующий началу коммутации;

$$e_a = E [\sin \Theta + A_3 \sin (3\Theta + \alpha_3)], \quad (5)$$

где E — амплитуда основной гармоники э. д. с.;

A_3 — относительная амплитуда третьей гармоники э. д. с.;

α_3 — начальная фаза третьей гармоники э. д. с.

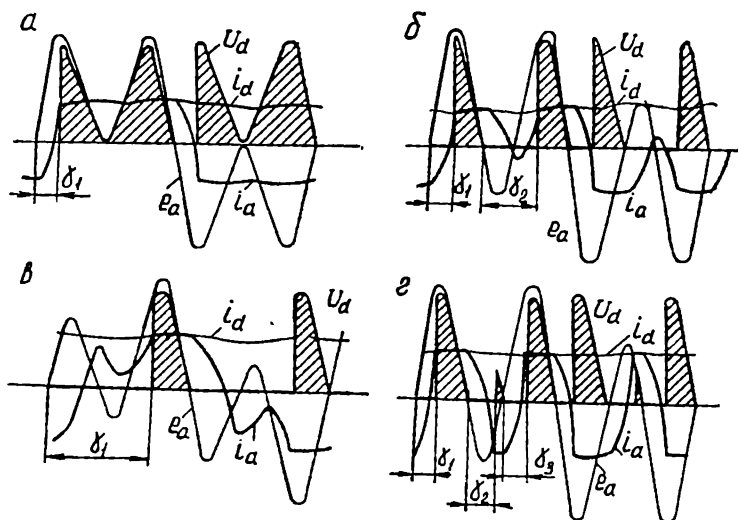


Рис. 2. Осциллограммы установившихся режимов работы выпрямителя на индуктивную нагрузку, полученные на модели при $r_a/x_a = 0,1$; $r_d/x_d = 0,1$:

$$а, б, в, г — \frac{x_a}{r_d} = 0,4; \alpha_3 = 0; A_3 = 1; 2; 2,6; 5; \frac{\pi}{2}; 1,5.$$

В зависимости от величины A_3 и α_3 можно выделить 4 варианта $N-A$ режима работы выпрямителя, отличающихся видом коммутационного процесса и количеством интервалов коммутации за время полупериода основной частоты.

При малых значениях A_3 , когда кривая э. д. с. имеет один переход через нуль в течение полупериода основной частоты, выпрямитель будет работать в режиме одной нормальной коммутации (рис. 2, а).

С увеличением A_3 кривая э. д. с. будет иметь 3 перехода через нуль в течение полупериода основной частоты и в общем случае 3 неравных полувольты: большую, среднюю и малую. Очевидно, в некоторых случаях за время действия малой полувольты э. д. с. ток i_{ak} не успевает достичь величины $2I_d$, необходимой для завершения коммутации, к моменту начала действия следующей полувольты э. д. с. обратного знака. В таких случаях получаются «сдвоенные» (рис. 2, б) или «строенные» (рис. 2, в) коммутации. Условие завершения коммутации за время действия n -й полувольты получается из (4) подстановкой $2I_d$ вместо i_{ak}

$$\left| \int_{\Theta_n}^{\Theta_{n+1}} e_a d\Theta \right| > 2I_d x_a, \quad (6)$$

где Q_n — угол, соответствующий моменту перехода кривой э. д. с. через нуль (начало n -й полувольты); отсчет ведется от начала положительной полувольты основной гармоники э. д. с. в соответствии с (5);

Θ_{n+1} — угол, соответствующий моменту следующего перехода кривой э. д. с. через нуль (конец n -й полувольты).

Интеграл, стоящий в левой части неравенства (6), на графике представляет собой площадь полувольты э. д. с., ограниченную осью абсцисс. Построением кривых э. д. с. для различных значений A_3 и α_3 можно показать, что условиями работы выпрямителя в режиме двух интервалов коммутации в течение полупериода основной частоты являются:

при $0 \leq \alpha_3 \leq \pi$

$$S_m < 2I_d x_a, \quad (7)$$

при $\pi < \alpha_3 < 2\pi$

$$\begin{aligned} S_m &< 2I_d x_a; \\ S_{cp} &> 2I_d x_a. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь S_m , S_{cp} — площади малой и средней полувольт. Особенностью этого режима является наличие одной нормальной и одной «сдвоенной» коммутации (рис. 2, б), при которой переходный ток i_{ak} в начале и конце интервала коммутации равен нулю (незавершенная коммутация).

При $\pi < \alpha_3 < 2\pi$ выпрямитель будет работать в режиме одной «строеной» коммутации (рис. 2, в), если

$$S_{cp} < 2I_d x_a. \quad (9)$$

При условии

$$S_m > 2I_d x_a \quad (10)$$

выпрямитель будет работать в режиме трех завершенных коммутаций в течение полупериода основной частоты (рис. 2, г) при-

ближаясь по мере увеличения A_3 к обычному $N - A$ режиму работы выпрямителя, питаемого синусоидальным напряжением тройной частоты.

Определение выпрямленного тока. Среднее значение выпрямленного тока с учетом (2)

$$I_d = \frac{\sum_1^m \int_{\Theta_m + \gamma_m}^{\Theta_{m+1}} e_a d\Theta}{\pi} \cdot \frac{1}{r_d}, \quad (11)$$

где m — число завершенных коммутаций за полпериода основной частоты ($m = 1; 3$);

Θ_m, Θ_{m+1} — углы, соответствующие моментам начала m -й или $(m+1)$ -й завершенной коммутации,

γ_m — полная угловая длительность завершенной коммутации.

Записав уравнения вида (4) для каждого интервала коммутации в пределах полупериода основной частоты, полагая $i_{ak} = 0$ для режима «сдвоенной» коммутации и $i_{ak} = 2I_d$ для других режимов и решив их совместно с (11), получим:

при $m = 1$

$$I_{d1} = \frac{E}{\frac{\pi}{2} r_d + x_a} \left| \left[\cos \Theta_1 + \frac{1}{3} A_3 \cos (3\Theta_1 + \alpha_3) \right] \right|, \quad (12)$$

при $m = 3$

$$I_{d3} = \frac{E}{\frac{\pi}{2} r_d + 3x_a} \left| \left\{ \cos \Theta_1 - \cos \Theta_2 + \cos \Theta_3 + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{3} A_3 [\cos (3\Theta_1 + \alpha_3) - \cos (3\Theta_2 + \alpha_3) + \cos (3\Theta_3 + \alpha_3)] \right\} \right|, \quad (13)$$

где $I_{d1}; I_{d3}$ — значения выпрямленного тока для режимов одной и трех коммутаций.

Решив совместно (12) и (13), получим условие перехода от режима одной коммутации к режиму трех коммутаций:

$$\frac{x_a}{r_d} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_3(A_3) - f_1(A_3)}{3f_1(A_3) - f_3(A_3)}, \quad (14)$$

где $f_1(A_3)$ и $f_3(A_3)$ — выражения, стоящие под знаком модуля в (12) и (13).

Для получения зависимости выпрямленного тока от величины A_3 в общем виде необходимо выразить $\cos \Theta_m$ и $\cos 3\Theta_m$ через A_3 и α_3 . При принятых допущениях можно считать, что моменты начала интервалов коммутации совпадают с соответствующими моментами перехода кривой э. д. с. через нуль. Последние определяются корнями уравнения

$$\sin \Theta + A_3 \sin (3\Theta + \alpha_3) = 0. \quad (15)$$

Для решения уравнения (13) используются 3 корня уравнения (15), а для решения (12) необходимо выбрать решение, соответствующее началу завершённой коммутации.

При $\alpha_3=0$ получим:

$$I_{d1} = \frac{E}{\frac{\pi}{2} r_d + x_a} \left(1 + \frac{1}{3} A_3 \right); \quad (16)$$

$$I_{d3} = \frac{E}{\frac{\pi}{2} r_d + 3x_a} \left[1 + \frac{1}{3} A_3 + \frac{2}{3} (A_3 - 1) \sqrt{1 - \frac{1}{A_3}} \right]. \quad (17)$$

При $\alpha_3=\pi$ имеем:

$$I_{d1} = \frac{E}{\frac{\pi}{2} r_d + x_a} \left(1 - \frac{1}{3} A_3 \right) \quad \text{при } 0 < A_3 < \frac{1}{3}; \quad (18)$$

$$I_{d1} = \frac{E}{\frac{\pi}{2} r_d + x_a} \cdot \frac{1}{3} (1 + A_3) \sqrt{1 + \frac{1}{A_3}} \quad \text{при } A_3 > \frac{1}{3}; \quad (19)$$

$$I_{d3} = \frac{E}{\frac{\pi}{2} r_d + 3x_a} \left[1 - \frac{1}{3} A_3 - \frac{2}{3} (A_3 + 1) \sqrt{1 + \frac{1}{A_3}} \right]. \quad (20)$$

Полученные выражения позволяют рассчитывать зависимость тока нагрузки от относительной величины третьей гармоники э. д. с. для двух предельных значений начальной фазы третьей гармоники. Точку перехода из режима одной коммутации в режим трех коммутаций проще всего определять графически, как точку пересечения кривых, построенных по (16) и (17) или (19) и (20).

Построение зависимостей $\dot{I}_d = f(A_3)$ для произвольных значений x_a/r_d по базисным кривым. Перепишем уравнения (12), (13) с обозначениями из (14)

$$I_{d1} = \frac{E}{\frac{\pi}{2} r_d + x_a} f_1(A_3);$$

$$I_{d3} = \frac{E}{\frac{\pi}{2} r_d + 3x_a} f_3(A_3).$$

Примем за базисную величину тока

$$I_{d0} = \frac{E}{\frac{\pi}{2} r_d + x_a}. \quad (21)$$

Тогда в относительных единицах

$$\hat{I}_{d1} = f_1(A_3); \quad (22)$$

$$I_{d2} = f_2(A_3) \frac{\frac{\pi}{2} + \frac{x_a}{r_d}}{\frac{\pi}{2} + 3 \frac{x_a}{r_d}}. \quad (23)$$

Пользуясь таким выбором базисного тока и зная f_1 и f_2 , легко построить характеристики $\hat{I}_d = f(A_3)$ при постоянной величине α_3 для любого значения x_a/r_d . Для этого необходимо при заданном α_3 определить значения косинусов, входящих в (12), (13), и, рассчитав f_1 и f_2 , построить две базисные кривые вида (22) и (23), полагая $x_a = 0$ (кривые 1 и 2 на рис. 3). При других значениях x_a кривые будут располагаться в зоне, ограниченной базисными кривыми.

Чтобы получить кривую $\hat{I}_d = f(A_3)$ при каком-либо значении x_a/r_d , достаточно перестроить кривую 2, перемножив ее ординаты на коэффициент k_x (кривая 2', рис. 3),

$$k_x = \frac{\frac{\pi}{2} + \frac{x_a}{r_d}}{\frac{\pi}{2} + 3 \frac{x_a}{r_d}}. \quad (24)$$

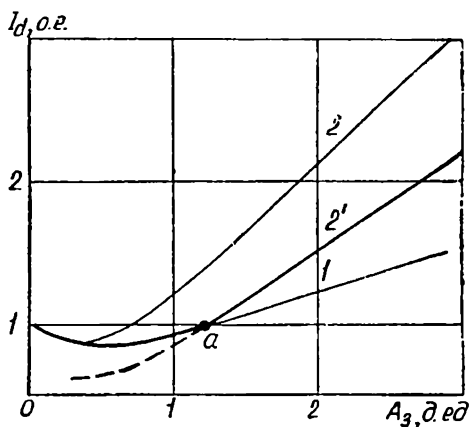


Рис. 3. Построение $\hat{I}_d = f(A_3)$ по двум базисным кривым при $\alpha_3 = \pi$, $x_a/r_d = 0,4$: 1 — базисная кривая режима одной коммутации $\hat{I}_{d1} = f_1(A_3)$; 2 — режима трех коммутаций $\hat{I}_{d2} = f_2(A_3)$; 2' — кривая 2 в масштабе k_x .

Искомая кривая до точки пересечения кривых 1 и 2' (точка «а» на рис. 3) совпадает с кривой 1, а далее — с кривой 2'. На рис. 4 приведены базисные кривые для $\alpha_3 = 0$ и $\alpha_3 = \pi$, по которым построены зависимости $\hat{I}_d = f(A_3)$ для различных x_a/r_d .

Здесь же представлены точки, полученные экспериментально на математической модели.

Определение зависимости $I_d^* = f(\alpha_3)$ на модели. Ввиду сложности решения уравнения (15) в общем виде, зависимость выпрямленного тока от начальной фазы третьей гармоники э. д. с. при постоянной величине A_3 исследовалась на математической модели, реализованной на аналоговой машине МН-7 (2 машины). Выпрямительный мост был представлен его физическим аналогом,

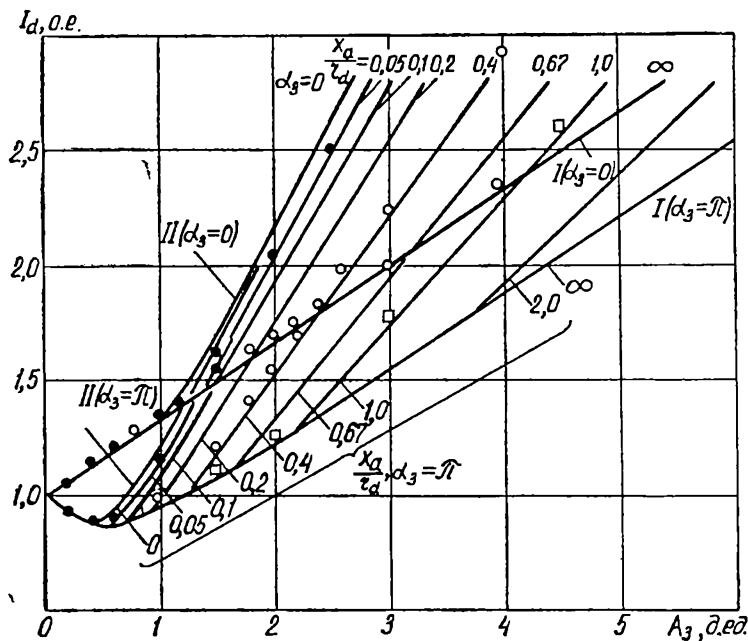


Рис. 4. Расчетные кривые $I_d^* = f(A_3)$ для различных значений x_a/r_d и экспериментальные точки, полученные на модели:

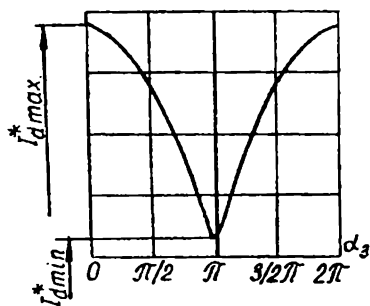
I, II — базисные кривые, построенные по уравнениям (16)–(20) при $x_a = 0$;

● — $\frac{x_a}{r_d} = 0.05$; ○ — 0.4; □ — 1.0.

собранным из вентилях Д-207. Соединение физической и математической моделей осуществлялось с использованием источников тока [2]. Эксперимент показал, что при $\alpha_3 = 0$ I_d имеет максимальное, а при $\alpha_3 = \pi$ — минимальное значение, совпадающее с расчетным. Кроме того, хотя пределы изменения величины I_d в зависимости от α_3 определяются значениями A_3 и x_a/r_d , характер этого изменения практически не зависит от A_3 и x_a/r_d и имеет вид кривой, показанной на рис. 5.

Таким образом, определение выпрямленного тока при питании однофазного мостового выпрямителя напряжением первой и третьей гармоник для $\alpha_3=0$ или $\alpha_3=\pi$ производится по формулам

Рис. 5. Характер изменения выпрямленного тока в зависимости от начальной фазы третьей гармоники при постоянных A_3 и $\frac{x_a}{r_d}$.



(16) — (20) или рис. 4, после чего можно определить значение выпрямленного тока для любого значения α_3 с помощью экспериментальной кривой рис. 5.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Г. Комар. Работа полупроводниковых выпрямителей в цепях управления. М., ГЭИ, 1952.
2. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах. Под ред. Н. И. Соколова. М., «Энергия», 1970.